

## Заключение

В режиме технологического горения синтезированных композиционных материалов, в том числе — многослойные, предназначенные для изготовления элементов радиационной защиты. Анализ результатов приборных экспериментов по изучению защитных от ионизирующих излучений свойств композиционных материалов, полученных в режиме технологического горения, позволяет сформулировать следующие выводы:

- материалы, полученные методом СВС, обеспечивают уникальное сочетание ядерно-физических, реологических свойств (микрорельеф по-

верхности, пористость, форма и размер пор) и массогабаритных параметров, которое позволяет их использовать для эффективной защиты от потоков быстрых нейтронов и  $\gamma$ -квантов;

- метод СВС позволяет получать многослойные композиционные материалы, обеспечивающие преимущества по массогабаритным показателям при защите от потоков быстрых нейтронов;
- эффективно ослабляя потоки  $\gamma$ -квантов, СВС-материалы значительно «смягчают» спектр за защитой за счет более интенсивного рассеяния не поглотившихся квантов в объеме материала.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Новиков Н.П., Боровинская Н.П., Мержанов А.Г. Термодинамический анализ реакций самораспространяющегося высокотемпературного синтеза // В сб.: Процессы горения в химической технологии и металлургии / Под ред. А.Г. Мержанова. — Черноголовка, 1975. — С. 174–188.
2. Бойко В.И., Долматов О.Ю., Шаманин И.В., Нудин О.А. Направленный самораспространяющийся высокотемпературный синтез ряда взрывозамещающих металлокерамических материалов // Физика горения и взрыва. — 1996. — Т. 32. — № 1. — С. 58–65.
3. Демянчук Д.Г., Долматов О.Ю. Направленный синтез и использование нетрадиционных катодных материалов // Известия вузов. Физика. — 2000. — Т. 43. — № 5. — С. 24–29.
4. Bojko V.I., Dolmatov O.Yu., Shamanin I.V., Yushitsin K.V. High-current emitters synthesized by technological combustion // Instruments and Experimental Techniques. — 1993. — V. 36. — № 5. — P. 790–792.
5. Bojko V.I., Dolmatov O.Yu., Shamanin I.V., Kadlubovich B.E. A composite explosive emission cathode made from a metal ceramic with lanthanum and titanium borides // Instruments and Experimental Techniques. — 1995. — V. 38. — № 2. — P. 272–274.
6. Бартоломей Г.Г., Бать Г.А., Байков В.Д., Алхутлов М.С. Основы теории и методы расчета ядерных энергетических реакторов. — М.: Энергоатомиздат, 1989. — 512 с.
7. Demyanyuk D.G., Dolmatov O.Yu., Rikhevitch M.P. Application of Self-propagating High-temperature Synthesis to High-current Electronics // International Journal of Self-propagating High-temperature Synthesis. — 2004. — V. 13. — № 2. — P. 183–192.
8. Аккерман А.Ф., Грудский М.Я., Смирнов В.В. Вторичное электронное излучение из твердых тел под действием  $\gamma$ -квантов. — М.: Энергоатомиздат, 1986. — 186 с.

УДК 621.039.532.21

## ОЦЕНКА РЕСУРСА ГРАФИТА ТОПЛИВНЫХ БЛОКОВ РЕАКТОРА ГТ-МГР

В.И. Бойко, П.М. Гаврилов\*, Ф.П. Кошелев, В.Н. Мещеряков\*, В.Н. Нестеров, А.В. Ратман\*\*, И.В. Шаманин

Томский политехнический университет

\*ФГУП Сибирский химический комбинат. г. Северск

\*\*ФГУП Горно-химический комбинат. г. Железногорск

E-mail: nesterov@phtd.tpu.edu.ru

Изложена методика определения ресурса реакторного графита с учетом особенностей спектра нейтронов и сопутствующего гамма-излучения в активной зоне. Проведена оценка ресурса графита топливных блоков реактора ГТ-МГР с учетом уменьшения значения критического флюенса в высокотемпературной области и повышенного значения плотности потока повреждающих нейтронов в компактной активной зоне. Сформулированы рекомендации относительно определения интервала между перегрузками топлива, выполнение которых обеспечивает гарантированную безопасную эксплуатацию топливных блоков.

## Введение

Одним из реакторов нового поколения, удовлетворяющих требованиям развивающейся атомной энергетики, является газотурбинный модульный высокотемпературный гелиевый реактор (ГТ-МГР). Из принципиальных особенностей ГТ-МГР [1], требующих повышенного внимания к определению ресурса графита, являются:

- повышенная безопасность, обусловленная самозащищенностью и невозможностью плавления активной зоны при тяжелых авариях;

- эффективное использование ядерного топлива и возможность реализации различных вариантов топливных циклов: уран-ториевого, плутоний-ториевого.

Проблема состоит в том, что значения критического флюенса графита в высокотемпературной области 800...1000 °С уменьшаются в пределах  $10^{22}...2 \cdot 10^{21}$  см<sup>-2</sup> [2], соответственно. Компактность активной зоны приводит к росту доли повреждающих нейтронов ( $E_n > 0,18$  МэВ) в общем потоке. Эти обстоятельства обуславливают уменьшение

значения ресурса графита в 2...3 раза. Таким образом, реалистичная оценка ресурса графита в реакторе ГТ-МГР с компактной активной зоной требует учета поведения критического флюенса в высокотемпературной области и особенностей спектра нейтронов, максимум которого смещается в высокоэнергетическую область.

### Активная зона реактора ГТ-МГР

При проектировании ГТ-МГР за основу был принят реактор тепловой мощностью 600 МВт с кольцевой активной зоной, разработанный компанией General Atomics [3]. Активная зона в поперечном сечении представляет собой кольцо шестигранной формы, окруженное центральным (цилиндрическим) и боковым (кольцевым) графитовыми отражателями. Топливный блок (рис. 1) представляет собой шестигранную графитовую призму с топливными элементами, размещенными в отверстиях блока — 3. В блоках имеются отверстия для загрузки выгорающего поглотителя — 2 и прохода гелиевого теплоносителя — 1. Активная зона содержит 102 топливные колонны, каждая из которых набрана из 10 топливных блоков. Блоки в колонне фиксируются с помощью штифтов. Основные характеристики активной зоны представлены в табл. 1.

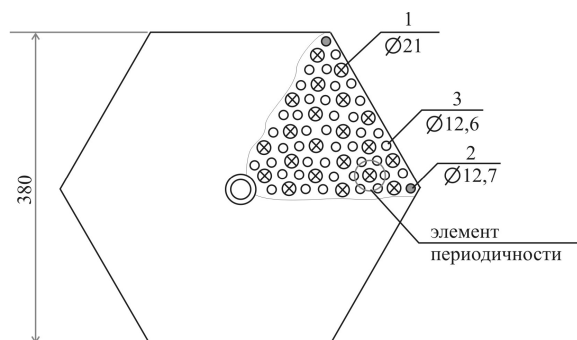


Рис. 1. Каналы топливного блока активной зоны реактора ГТ-МГР: 1) для теплоносителя; 2) для выгорающего поглотителя; 3) для топливного элемента, мм

Загрузка урана в расчете на один топливный блок, содержащий 198 топливных элементов диаметром 1,26 см и высотой 79,2 см, составляет 4,25 кг. Топливный элемент представляет собой графитовый стержень, диспергированный сферическими микротвэлами. В каждом топливном элементе содержится 35300 микротвэлов, часть из них содержит обедненный диоксид урана. Соотношение топливных и воспроизводящих микрочастиц 2,5/1. Обогащение по  $U^{235}$  составляет 19,9 %. Среднее по активной зоне обогащение — 14 %.

### Определение тепловыделения, обусловленного потоком сопутствующего гамма-излучения

Анализ современного состояния исследований свойств реакторного графита показывает, что заметное влияние на значение критического флюенса и,

следовательно, ресурс графита оказывают значения плотности потока сопутствующего  $\gamma$ -излучения и эквивалентной температуры облучения [4]. Эквивалентная температура облучения образована суммарным тепловыделением за счет замедления нейтронов и поглощения  $\gamma$ -квантов в объеме графита [5].

Таблица 1. Основные характеристики активной зоны, определяющие ресурс графита ГТ-МГР [3]

Характеристика	Значение
Тепловая мощность активной зоны, МВт	600
Внутренний эквивалентный диаметр, м	2,96
Внешний эквивалентный диаметр, м	4,84
Высота активной зоны, м	7,92
Средняя удельная энергонапряженность, МВт/м <sup>3</sup>	6,6
Количество топливных колонн в активной зоне	102
Количество топливных блоков в колонне	10
Загрузка урана на топливный блок, кг	4,25
Обогащение по $U^{235}$ , %	19,9 (14 – среднее по активной зоне)
Время между перегрузками, эфф. сут	540
Кампания топлива в активной зоне, эфф. сут.	1080
Максимальное выгорание топлива, МВт·сут/тU	$1,4 \cdot 10^5$
Максимальная удельная энергонапряженность активной зоны, МВт/м <sup>3</sup>	< 23
Давление теплоносителя, МПа	7,07
Температура теплоносителя (вход/выход активной зоны), °C	490/850

Тепловыделение, обусловленное замедлением нейтронов, прямо пропорционально плотности потока нейтронов и определяется нейтронно-физическими особенностями реактора. Плотность объемного тепловыделения за счет нейтронов в центральном графитовом блоке  $q_v^H$  определяется соотношением [5]:

$$q_v^H = \left( \frac{E_n}{E_f} \right) \cdot k_v \cdot \left( \frac{\xi \Sigma_s}{\xi \Sigma_a} \right) \cdot \left( \frac{N}{V_{A3}} \right), \quad (1)$$

где  $E_n$  — энергия, уносимая нейтронами деления в графит;  $E_f$  — энергия деления  $U^{235}$ ;  $\xi \Sigma_s$  — замедляющая способность графита;  $\xi \Sigma_a$  — средняя замедляющая способность материала активной зоны;  $N$  — тепловая мощность реактора;  $V_{A3}$  — объем активной зоны;  $k_v$  — коэффициент неравномерности энерговыделения по объему активной зоны.

В активной зоне  $\gamma$ -кванты образуются при делении, при переходе осколков деления из возбужденного состояния в основное и в результате поглощения нейтронов ядрами среды. Для всех ядер имеются строго определенные энергетические уровни возбуждения и механизмы снятия этого возбуждения, свойственные только данному сорту ядер. Следовательно, спектр  $\gamma$ -излучения зависит от материального состава активной зоны и состава ядерного топлива. Материальный состав и степень гетерогенности активной зоны также оказывают влияние на процесс поглощения энергии  $\gamma$ -излуче-

ния и, тем самым, определяют – какая доля энергии  $\gamma$ -квантов преобразуется в тепловую в блоке замедлителя. Следовательно, тепловыделение, обусловленное поглощением  $\gamma$ -квантов, прямо пропорционально плотности потока тепловых нейтронов. Его вклад в суммарное тепловыделение определяется материальным составом и гетерогенностью активной зоны. Таким образом, в соотношении (1) необходимо внести фактор (множитель)  $\Delta$ , характеризующий отношение суммарного тепловыделения за счет нейтронов и  $\gamma$ -квантов к тепловыделению только за счет нейтронов. В результате:

$$q_v'' = \left( \frac{E_n}{E_f} \right) \cdot k_v \left( \frac{\xi \Sigma_s}{\xi \Sigma_s} \right) \cdot \left( \frac{N}{V_{A3}} \right) \cdot \Delta. \quad (2)$$

#### Определение значения флюенса повреждающих нейтронов

Для определения нейтронно- и теплофизических параметров эксплуатации реакторного графита в топливном блоке выделяется элемент периодичности (рис. 1), который содержит один канал для теплоносителя и два топливных канала (по совокупности фрагментов). Эквивалентный радиус элемента периодичности составляет  $R_3 = 1,98$  см.

Из средней удельной энергонапряженности ( $\bar{q}_v$ ) определяется плотность потока тепловых нейтронов:

$$\Phi_m = \frac{\bar{q}_v}{E_f \cdot \bar{\Sigma}_f},$$

где  $\bar{\Sigma}_f$  – среднее по топливному блоку значение макроскопического сечения деления.

На предварительном этапе расчета предполагается, что распределение плотности потока быстрых нейтронов и сопутствующих  $\gamma$ -квантов по активной зоне равномерно [5]. Плотность потока быстрых нейтронов  $\Phi_b$  разделяется на плотность потока повреждающих нейтронов  $\Phi_n$  ( $E_n > 0,18$  МэВ) и не повреждающих нейтронов ( $340 \text{ эВ} < E_n < 0,18$  МэВ). Так же разделяются плотности потоков резонансных нейтронов  $\Phi_r$  и тепловых нейтронов  $\Phi_m$ . Оценки показывают, что плотности потоков нейтронов для водоохлаждаемых графитовых реакторов соотносятся примерно как:

$$\Phi_b / \Phi_n = 2,75; \quad \Phi_b / \Phi_r = 2,17; \quad \Phi_r / \Phi_m = 2,17.$$

Для реакторов ГТ-МГР отношения плотностей потоков быстрых и повреждающих нейтронов, быстрых и резонансных нейтронов изменяются незначительно. Это объясняется практически неизменным отношением объемов замедлителя (графита) и топлива. Однако, спектр нейтронов становится более жестким. Это связано с тем, что количество замедлителя (графита) между соседними сферическими микротвэлами, диспергированными в топливный графитовый стержень, очень мал. Диаметр микротвэлов составляет около 800 мкм, расстояние между ними не превышает 1400 мкм, то есть реализуется случай “тесной” топливной ре-

шетки. Значительная часть делений вызывается эпитепловыми нейтронами. В результате 26-группового расчета получены следующие соотношения:

$$\Phi_b / \Phi_n = 2,55; \quad \Phi_b / \Phi_r = 2,06; \quad \Phi_r / \Phi_m = 3,07.$$

Значение флюенса повреждающих нейтронов за год (270 эфф. сут) эксплуатации реактора, таким образом, составляет  $1,3 \cdot 10^{21} \text{ см}^{-2}$ .

#### Определение значения критического флюенса

Для определения значения критического флюенса необходимо провести расчет эквивалентной температуры облучения графита [6]. Для консервативной оценки можно считать, что активная зона гомогенна, и вся энергия деления выделяется в графите. Расход теплоносителя в одном канале рассчитывается по формуле:

$$G = \frac{N}{n_{эл} (T_{вых} - T_{вх}) C_p},$$

где  $n_{эл}$  – количество элементов периодичности в активной зоне;  $C_p$  – теплоемкость теплоносителя;  $T_{вх}$  и  $T_{вых}$  – температура входа и выхода теплоносителя. Все термодинамические характеристики теплоносителя выбирались для температуры 700 °С и давления 7,07 МПа.

Скорость теплоносителя в канале определяется соотношением:

$$v = \frac{G}{\rho \cdot S_{TH}},$$

где  $\rho$  – плотность теплоносителя;  $S_{TH}$  – проходное сечение для теплоносителя. Ее значение составляет 23 м/с.

Для расчета значения коэффициента теплоотдачи используется формула:

$$\alpha = \frac{\lambda}{d} \cdot Nu,$$

где  $Nu$  – критерий Нуссельта;  $\lambda$  – коэффициент теплопроводности теплоносителя;  $d$  – эквивалентный диаметр канала (в данном случае он равен геометрическому).

В практике теплогидравлических расчетов для цилиндрических и плоских поверхностей в случае турбулентного потока используется следующее соотношение [7]:

$$Nu = 0,021 \cdot Re^{0,8} \cdot Pr^{0,43},$$

где  $Re$  и  $Pr$  – критерии Рейнольдса и Прандтля. Их значения определяются по формулам:

$$Re = v \cdot d / \nu; \quad Pr = \nu / a,$$

где  $\nu$  и  $a$  – кинематическая вязкость и коэффициент температуропроводности теплоносителя.

Коэффициент теплоотдачи составляет 1400 Вт/(м²·К) при  $Re = 4 \cdot 10^4$  (турбулентный поток).

Эквивалентная температура облучения графита в элементе периодичности определяется соотношением [6]:

$$T(r) = T_{TH} + q_s \times \left[ \frac{1}{\alpha} + \frac{R_{TK}}{\lambda_{зам} (1 - R_{TK}^2 / R_9^2)} \left( \ln \frac{r}{R_{TK}} - \frac{r^2 - R_{TK}^2}{2R_9^2} \right) \right],$$

где  $R_{TK}$  – радиус канала для теплоносителя;  $R_{TK} \leq r \leq R_9$  – радиальная координата,  $r$ ,  $T_{TH}$  – среднее значение температуры теплоносителя (700 °С);  $\lambda_{зам}$  – коэффициент теплопроводности реакторного графита;  $q_s = \frac{(R_9^2 - R_{TK}^2)}{2R_{TK}} q_v$  – поверхностная плотность теплового потока;  $q_v$  определяется в соответствии с формулой (2).

Значение критического флюенса, как функции эквивалентной температуры облучения, определяется по полиному второй степени [6]:

$$F(T) = a_0 + a_1 \cdot T + a_2 \cdot T^2,$$

где  $a_0 = 5,92$ ;  $a_1 = -9,06 \cdot 10^{-3}$ ;  $a_2 = 3,31 \cdot 10^{-6}$  – коэффициенты полиномиальной аппроксимации;  $T$  – измеряется в °С;  $F$  – в  $10^{22}$  см<sup>-2</sup>.

#### Результаты расчета и выводы

Определено, что среднее по активной зоне значение эквивалентной температуры облучения графита на эквивалентном радиусе элемента периодичности (т.е. в объеме топливного блока) при средней удельной энергонапряженности 6,6 МВт/м<sup>3</sup> составляет 785 °С. При таком значении графит может эксплуатироваться более 6 лет, следовательно, проектная кампания топлива длительностью 1080 эфф. сут с запасом обеспечена работоспособностью графита. Однако, при максимальном значении удель-

ной энергонапряженности 23 МВт/м<sup>3</sup> эквивалентная температура облучения достигает 1000 °С. При таком значении ресурс графита составляет около 1,5 лет. Следовательно, кампания топлива не обеспечивается работоспособностью графита топливных блоков, расположенных в наиболее энергонапряженных областях активной зоны.

Таким образом, для гарантированной безопасной эксплуатации топливных блоков в активной зоне необходимо:

- уменьшить интервал между перестановками топливных блоков в 2 раза. Проектный интервал составляет 540 эфф. сут, что соответствует 2 годам, а с учетом особенностей зависимости критического флюенса от температуры и спектра нейтронов в ГТ-МГР он не должен превышать 270...300 эфф. сут;
- перемещение топливных блоков производить по картограммам, при разработке которых следует учитывать значения температуры, плотности потока нейтронов и доли повреждающих нейтронов в месте размещения блока;
- перемещать топливные блоки не только в радиальном и азимутальном, но и в аксиальном направлениях. Маршрут движения блока, начинающийся на периферии активной зоны (внешний или внутренний радиусы) должен заканчиваться на полувысоте активной зоны. При этом реализуется режим движения топлива “от периферии к центру активной зоны”, который обеспечивает приближение к режиму непрерывной перегрузки (перемещения).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Ран Ф., Адамантиадес А., Кентон Дж., Браун Ч. Справочник по ядерным энерготехнологиям / Под ред. В.А. Легасова. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 752 с.
2. Карпунин В.И., Николаенко В.А., Кузнецов В.Н. Критический флюенс нейтронов как фактор, определяющий ресурс графитовой кладки РБМК // Атомная энергия. – 1997. – № 5. – С. 325–330.
3. Основные положения концептуального проекта и компоненты установки ГТ-МГР. “General Atomics” – А 21351, June, 1993. – 112 с.
4. Виргильев Ю.С. Свойства реакторного графита и его работоспособность в водографитовых реакторах // Материаловедение. – 2001. – № 2. – С. 44–52.
5. Глушков Е.С., Демин В.Е., Пономарев-Степной Н.Н., Хрулев А.А. Тепловыделение в ядерном реакторе / Под ред. Н.Н. Пономарева-Степного. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 160 с.
6. Бойко В.И., Шидловский В.В., Нестеров В.Н. и др. Определение ресурса реакторного графита с учетом неравномерности энерговыделения по высоте активной зоны // Известия вузов. Сер. Ядерная энергетика. – 2004. – № 4. – С. 26–30.
7. Кириллов П.Л., Юрьев Ю.С., Бобков В.П. Справочник по теплогидравлическим расчетам (ядерные реакторы, теплообменники, парогенераторы) / Под общ. ред. П.Л. Кириллова. – М.: Энергоатомиздат, 1990. – 360 с.